

## 第七章 交流绕组的磁动势

- 概述
- 单相绕组的磁动势
- 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势
- 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势
- 三相绕组磁动势的空间谐波分量和时间谐波分量



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 1. 概述

- 气隙磁场对电机的机电能量转换和运行特性具有重要影响
- 磁场建立方式：
  - 电励磁：电流激励产生磁场
  - 永磁励磁：永磁体产生磁场
- 磁场性质：
  - 励磁磁场：由励磁绕组或永磁体产生
  - 电枢反应磁场：由电枢绕组产生



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 1. 概述

### ➤ 几点假定：

- 绕组的电流随时间按**正弦规律**变化，不考虑**高次谐波电流**
- 槽内电流集中于槽中心处，**齿槽**的影响不计，定转子间的气隙是**均匀**的，**气隙磁阻为常数**
- 铁芯**不饱和**，略去定转子铁芯的**磁压降**



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 2. 单相绕组的磁动势

### ➤ **线圈**的磁动势

### ➤ **线圈组**的磁动势

### ➤ **单相绕组**的磁动势



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

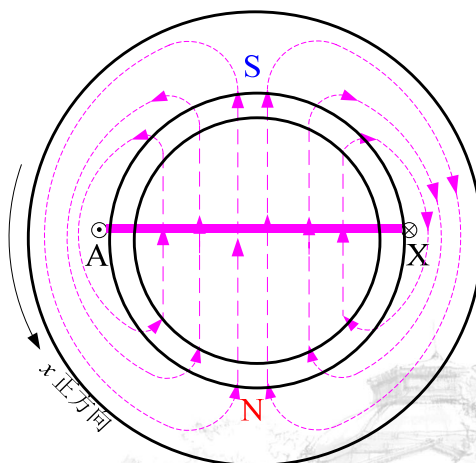
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 线圈的磁动势

## 整距元件的磁势

➤ 磁力线穿过**转子铁心**、**定子铁心**和**两个气隙**

➤ 相对于气隙而言，由于铁心磁导率极大，**铁芯的磁压降**可以忽略不计



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 线圈的磁动势

- **整距**元件： $y=\tau$ ，通以电流后，在气隙空间形成**一对磁极**，且**两个气隙**的磁通密度相同

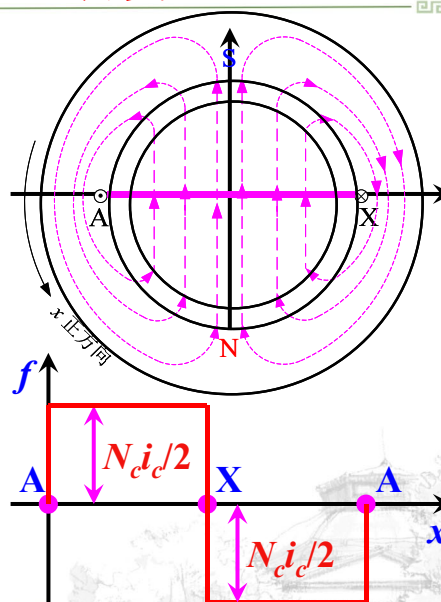
- 一个气隙上消耗的磁势为：

$$F_c = N_c i_c / 2$$

- 如果通过线圈的电流为**正弦波**：

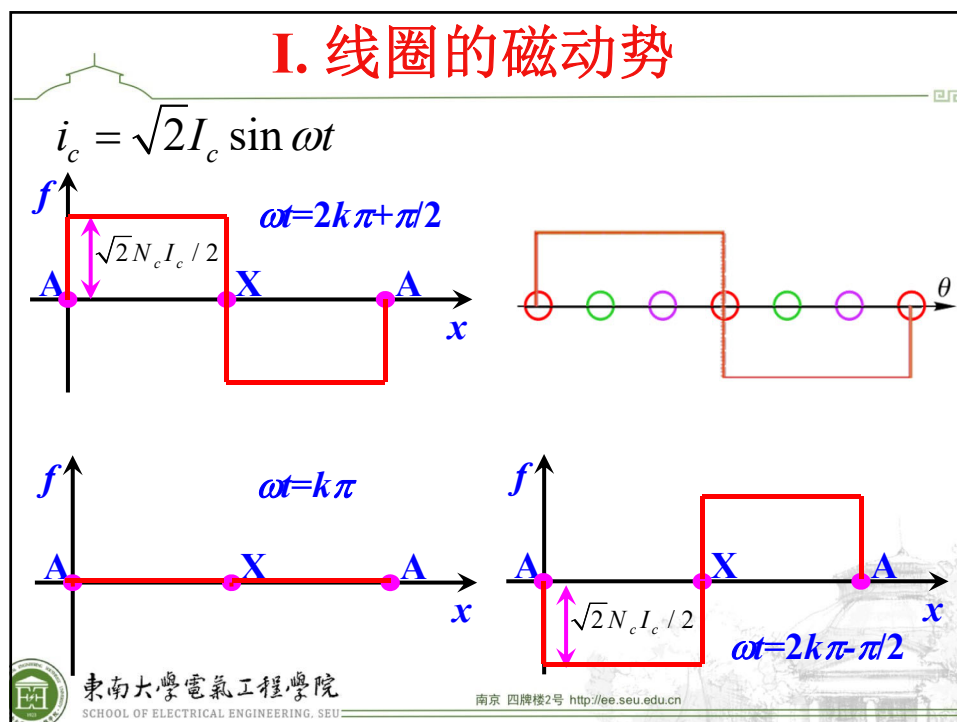
$$i_c = \sqrt{2} I_c \sin \omega t$$

- 矩形波的**高度(振幅)**也按**正弦变化**



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>




### I. 线圈的磁动势

- 每极磁势沿气隙分布呈**矩形波**，纵坐标的**正负**表示**极性**
- 由于**电流**随时间按**正弦**规律变化，所以**磁势波**的高度也随时间按**正弦**规律变化
- **磁势空间位置固定不变**（磁轴不变）
- **性质：脉动磁动势**
- 脉动的**频率**决定于**电流的频率**
- 矩形波可分解为**基波**及各次**谐波**

东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1	<p>试题 在忽略电机铁心磁压降的情况下，整距线圈的气隙磁动势的分布波形是（）。</p> <p>选项 <b>A 矩形波 B 正弦波 C 三角波 D 以上都不是</b></p>
2	<p>试题 对于一个整距线圈，匝数为N，电流为i在忽略电机铁心磁压降的情况下，气隙磁动势的大小为（）。</p> <p>选项 <b>A 0 B Ni/4 C Ni/2 D Ni</b></p>


 东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 脉动磁势的分解


设  $i_c = \sqrt{2}I_c \sin \omega t$       气隙磁势的幅值  $F_c = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c$

傅立叶分解：

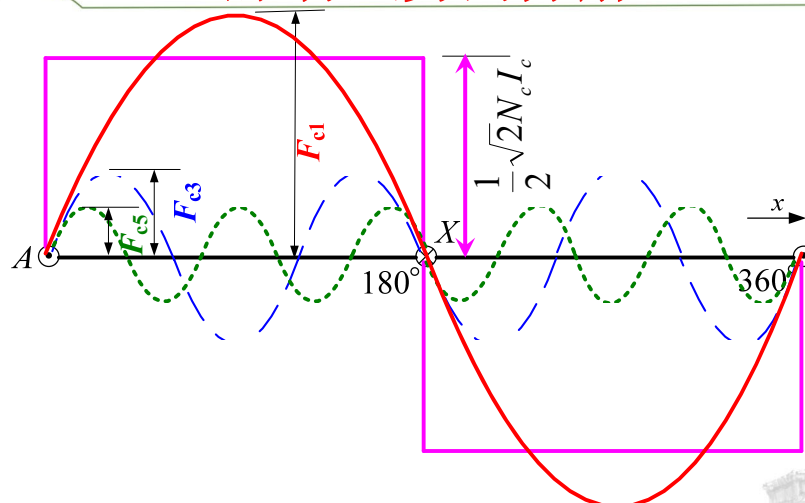
$$f = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \sin \omega t \left[ \frac{4}{\pi} \left( \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right) \right]$$

$$= F_{c1} \sin \omega t \sin x + F_{c3} \sin \omega t \sin 3x + F_{c5} \sin \omega t \sin 5x + \dots$$

$$F_{c1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{4}{\pi} N_c I_c = 0.9 N_c I_c \quad F_{cv} = \frac{1}{v} F_{c1}$$


 东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 脉动磁势的分解



- 由于结构**对称**，每极下磁密波对**磁极中心线**对称，**偶数次谐波**对中心线**非对称**，因而不存在



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 基波磁势分量的性质

$$F_{c1} \sin \omega t \sin x$$

- 在**空间**按**正弦**分布
- 在**时间**上，任何一个位置的磁势都按**正弦**变化
- **基波**是一个**正弦分布**的**正弦脉振磁势**



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

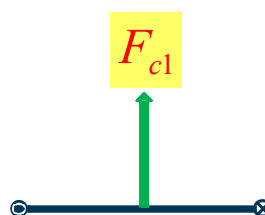
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 空间矢量

- 随时间按正弦规律变化量称为**时间相量**
- 在空间按正弦分布的量称为**空间矢量**

如何确定空间矢量：

1. 大小
2. 方向
3. 位置



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## II. 线圈组的磁动势

- **单层整距**绕组：每对极下由  $q$  个线圈组成线圈组，各线圈在空间依次相距  $\alpha$  电角度
- 设各元件的匝数  $N_c$  相等，当流过电流，便产生  $q$  个振幅相等、空间依次相距  $\alpha$  电角度的矩形磁势波
- 把每个矩形波分别进行分解，都含有**基波分量**和一系列**高次谐波分量**



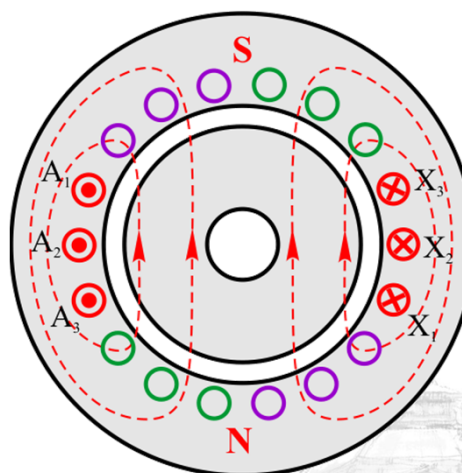
東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



## 单层分布相绕组的磁动势

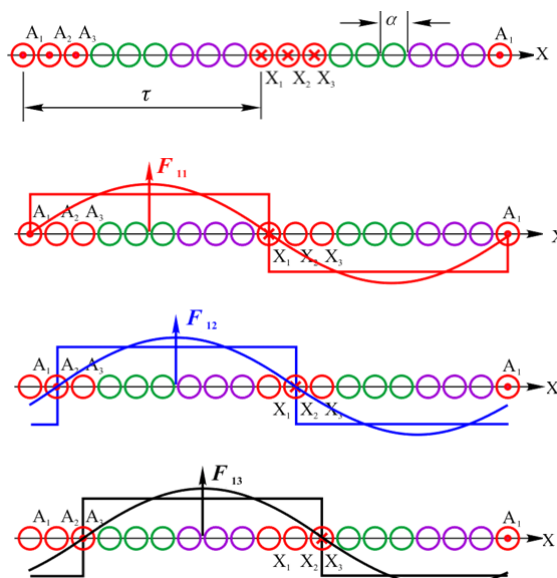
- ◆以 $Z=18$ ,  $p=1$ 的三相单层绕组为例。每相有1个线圈组,  $q=3$ , 每个线圈组有3个整距线圈。 $A_1X_1$ 、 $A_2X_2$ 、 $A_3X_3$ 串联成一个线圈组, 构成A相绕组。
- ◆A相通交流电流 $i$ 后, 产生一个2极磁场。



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 单层分布相绕组的磁动势



- ◆采用磁动势迭加原理, 三个线圈分别产生矩形波磁动势。磁动势波形一样, 依次位移槽距电角 $\alpha_1$ 度。

- ◆各线圈磁动势的基波分量为空间分布正弦波, 和时间相量相似, 可以用空间矢量来表示。

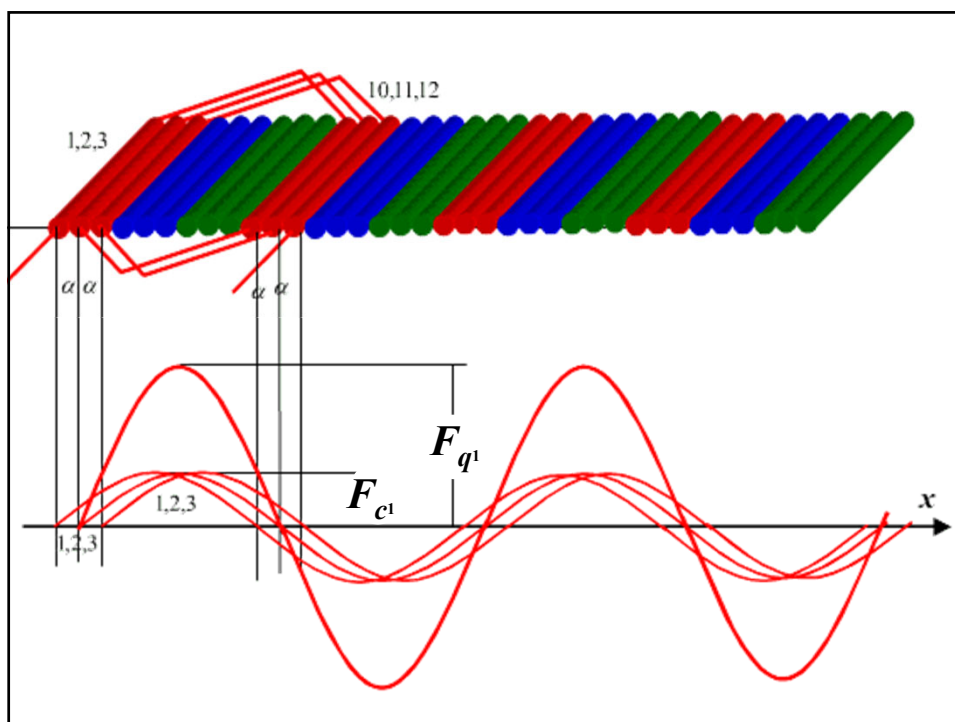
- ◆磁动势空间矢量的长度代表幅值的大小, 矢量的位置代表幅值所处的空间位置。



SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

<http://ee.seu.edu.cn>





分析：设  $q=3$ ,  $\alpha=20^\circ$

- 三个矩形磁势波的 3 个基波磁势分量，它们的振幅相等，空间相位差  $20^\circ$  电角度，把三个正弦波曲线相加得到线圈组的磁势基波
- 线圈组（合成）磁势的基波振幅为

$$F_{q1} = qF_{c1}K_{d1} = 0.9qN_cK_{d1}I_c$$

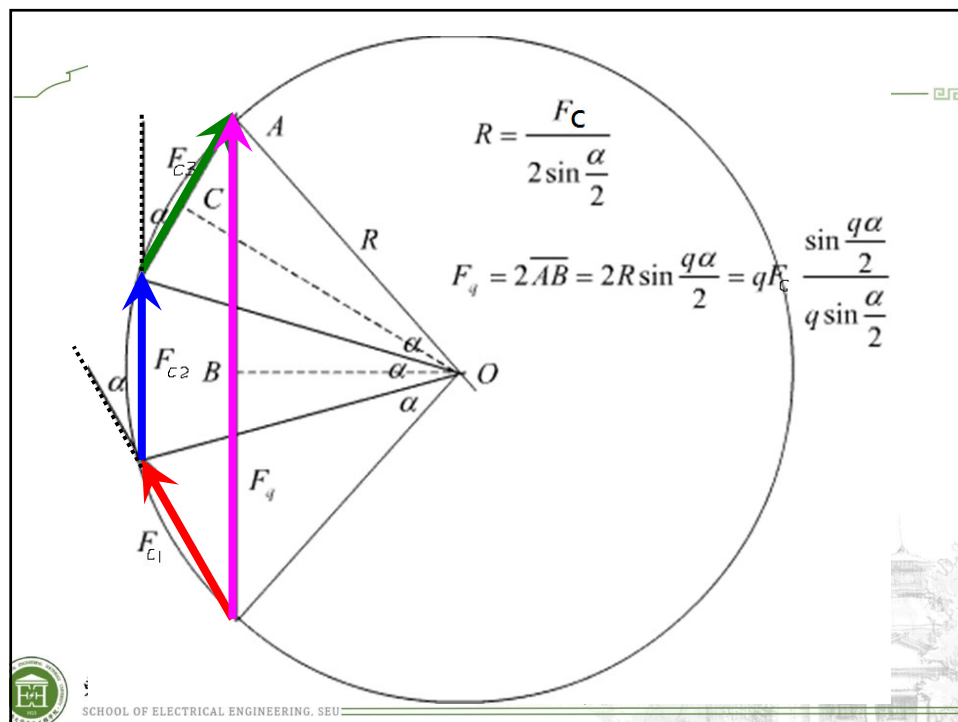
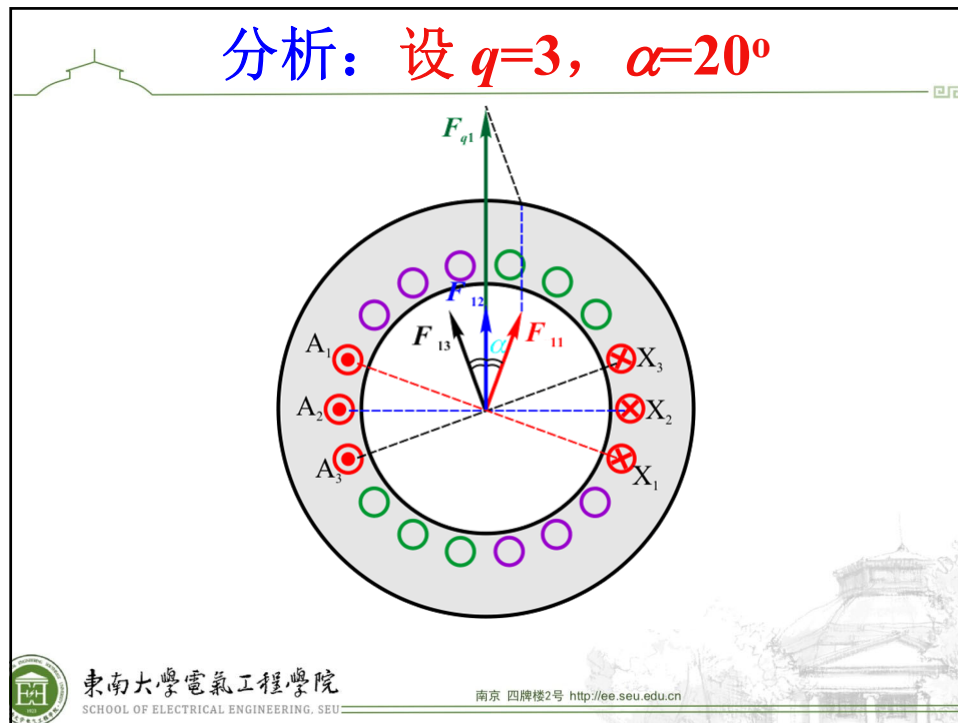
- $\nu$  次谐波振幅

$$F_{qv} = qF_{cv}K_{dv} = \frac{0.9}{\nu} qN_cK_{dv}I_c$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

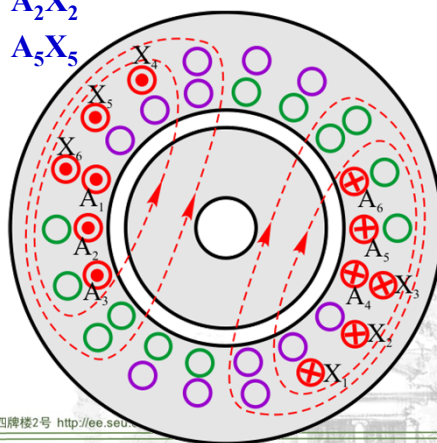


## 双层绕组的磁动势

### 双层短距分布相绕组的磁动势

◆以 $Z=18$ ,  $p=1$ ,  $y_1=7$ 的三相双层绕组为例。每相有2个线圈组,  $q=3$ , 每个线圈组有3个短距线圈。线圈 $A_1X_1$ 、 $A_2X_2$ 、 $A_3X_3$ 成一个线圈组, 线圈 $A_4X_4$ 、 $A_5X_5$ 、 $A_6X_6$ 构成另一个线圈组。

◆A相通交流电流 $i$ 后, 产生一个2极磁场。

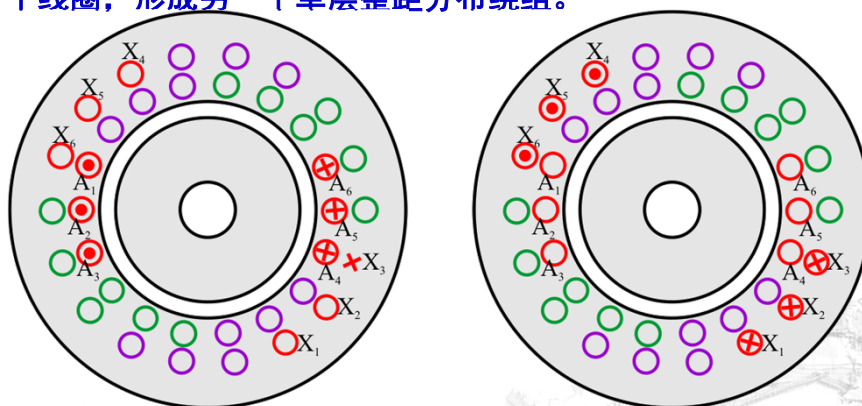


東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

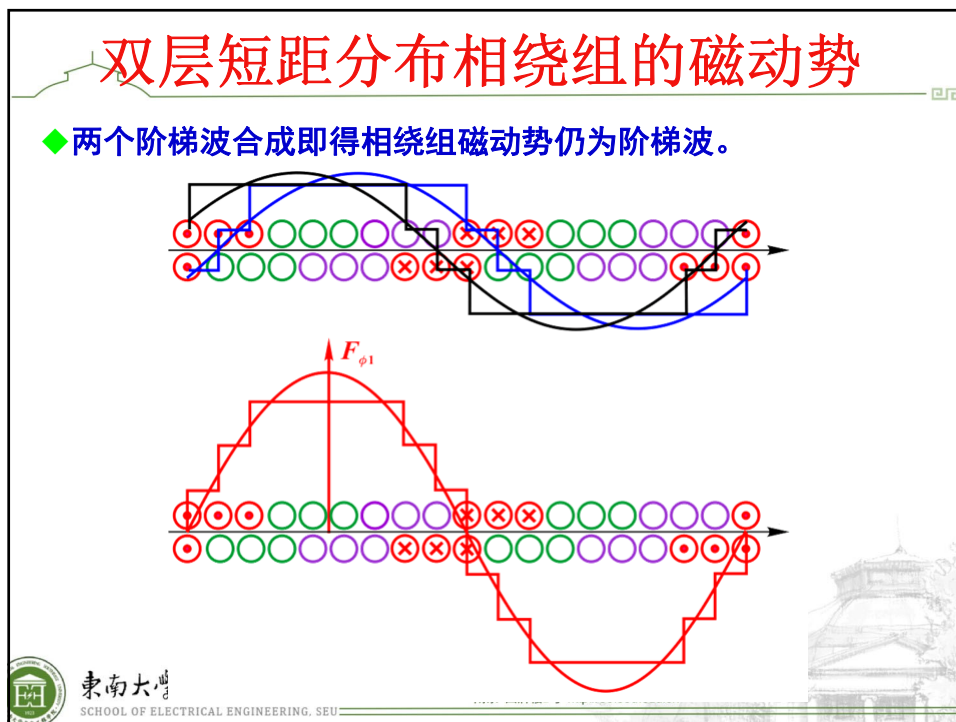
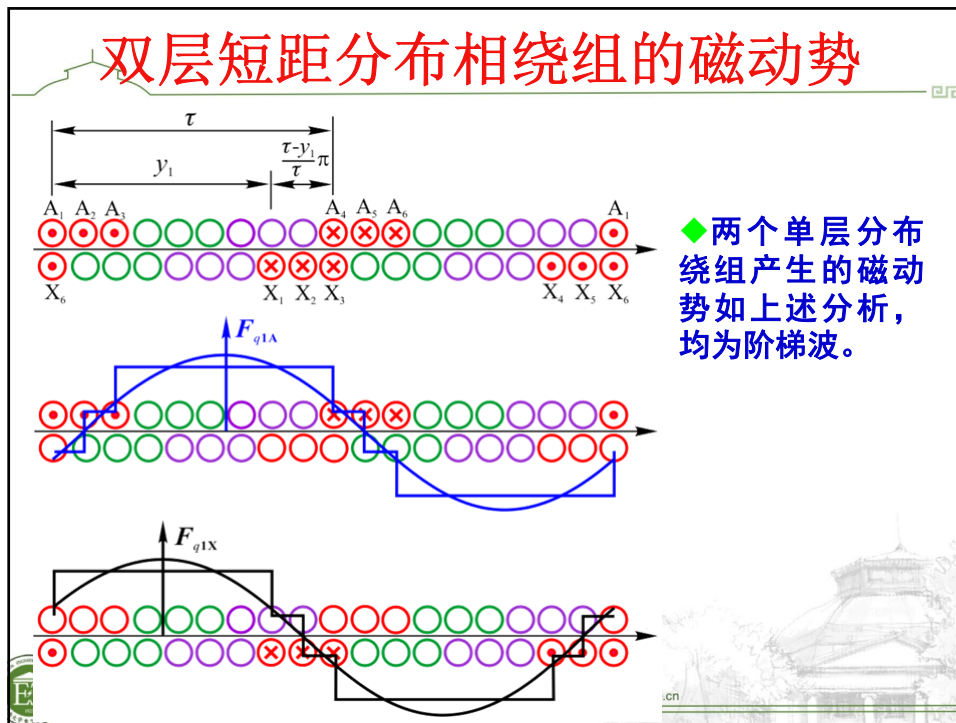
## 双层短距分布相绕组的磁动势

◆采用磁动势叠加原理,  $A_1—A_6$ 中电流单独作用, 将 $A_1A_4$ 、 $A_2A_5$ 、 $A_3A_6$ 分别看成是一个线圈, 形成了一个单层整距分布绕组;  $X_1—X_6$ 中电流单独作用, 将 $X_1X_4$ 、 $X_2X_5$ 、 $X_3X_6$ 分别看成是一个线圈, 形成另一个单层整距分布绕组。



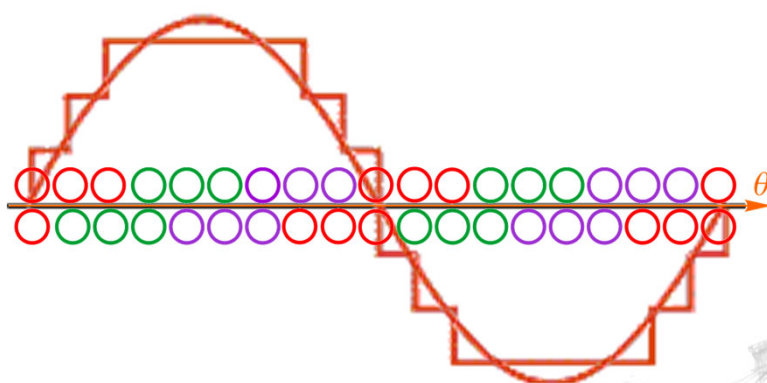
東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



## 双层短距分布相绕组的磁动势

◆相绕组磁动势为脉振磁动势。



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 双层绕组的磁动势

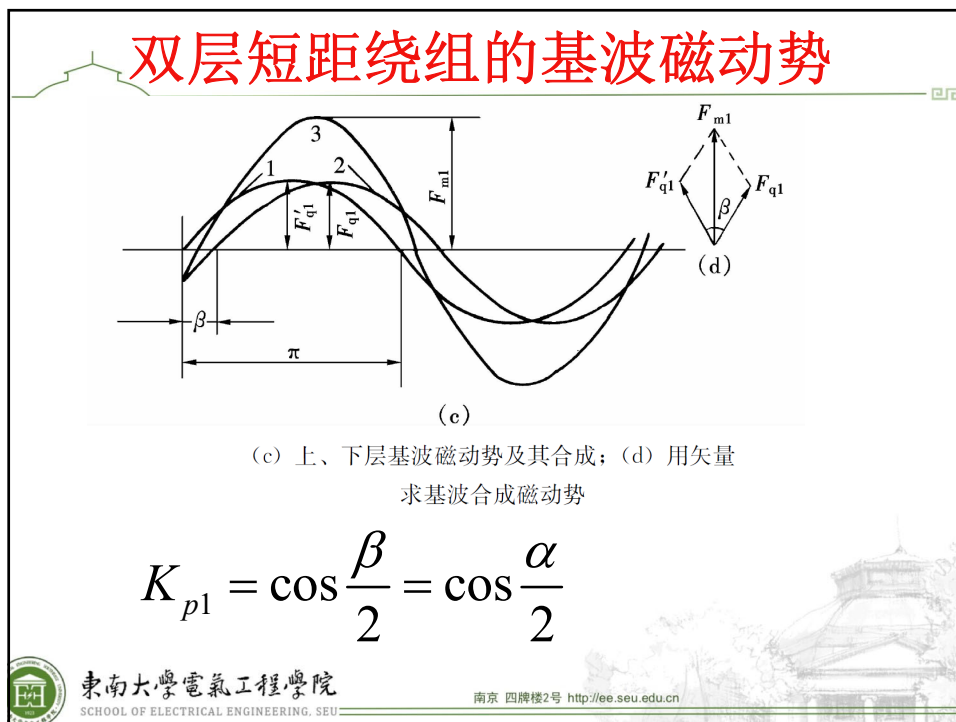
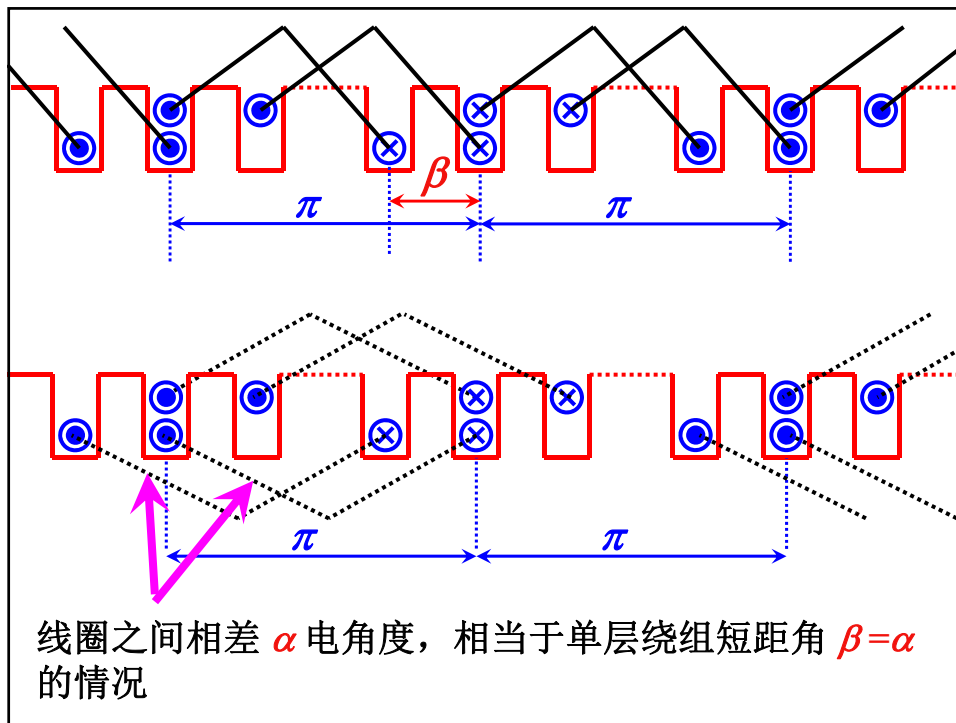
- **双层绕组**：每对极有**两个**线圈组，把两个线圈组的磁动势叠加，便得到双层绕组的磁动势
- 双层绕组通常是**短矩绕组**，从产生磁场的观点看，磁动势只决定于槽内导体电流的大小和方向，与线圈的组成次序无关
- 把**实际的短矩绕组**所产生的磁动势，**等效**地看成由**上、下层整距绕组**产生的磁动势之和
- 两个**等效单层绕组**在空间分布上错开一定的角度，这个角度等于**短矩角**



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>







## 双层绕组的磁势

- 双层绕组磁势的基波振幅

$$F_{m1} = 2F_{q1}K_{p1} = 0.9(2qN_c)K_{p1}K_{d1}I_c = 0.9(2qN_c)K_{N1}I_c$$

- 双层绕组磁势的  $\nu$  次谐波振幅

$$F_{m\nu} = 2F_{q\nu}K_{p\nu} = 0.9(2qN_c)\frac{K_{p\nu}K_{d\nu}}{\nu}I_c = 0.9(2qN_c)\frac{K_{N\nu}}{\nu}I_c$$

- $S$  为每槽导体数, 对于单层绕组  $S = N_c$ , 双层绕组  $S = 2N_c$
- 每相绕组串联匝数  $N = Sqp/a$



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 双层绕组的磁势

- 每对极磁动势:  $I = aI_c$   $N = Sqp/a$

$$f = 0.9qN_cI_c \sin \omega t (K_{N1} \sin x + \frac{1}{3}K_{N3} \sin 3x + \frac{1}{5}K_{N5} \sin 5x + \dots)$$

$$= 0.9 \frac{N}{p} I \sin \omega t (K_{N1} \sin x + \frac{1}{3}K_{N3} \sin 3x + \frac{1}{5}K_{N5} \sin 5x + \dots)$$

$$= F_{m1} \sin \omega t \sin x + F_{m3} \sin \omega t \sin 3x + F_{m5} \sin \omega t \sin 5x + \dots$$

$$f_1 = 0.9 \frac{NK_{N1}}{p} I \sin \omega t \sin x = F_{m1} \sin \omega t \sin x$$

$$f_\nu = 0.9 \frac{NK_{N\nu}}{\nu p} I \sin \omega t \sin \nu x = F_{m\nu} \sin \omega t \sin \nu x, \quad \nu = 3, 5, 7, \dots$$




東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

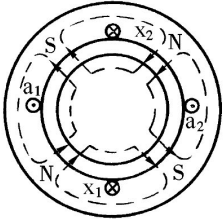
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1	<p>试题 交流绕组采用短距与分布后，其基波磁动势将（ ）。</p> <p>选项 A 减小 B 不变 C 增大 D 视情况而定</p>
2	<p>试题 通以正弦电流时，线圈的磁动势是（ ）。</p> <p>选项 A 恒定值 B 时间的函数 C 空间的函数 D 既是时间的函数，也是空间的函数</p>

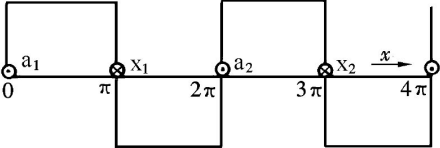

 东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### III. 单相绕组的磁动势

- 磁势是空间矢量，各对磁极分别有各自的磁路，不能合并不同空间的各对磁极的磁势
- 电势是时间相量，可以合并，有串联或并联




(a)



(b)

图 7-6 4 极整距元件的磁动势  
(a) 磁场；(b) 磁动势分布波


 东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU  
 南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### III. 单相绕组的磁动势

- 单相分布绕组的磁势呈阶梯形分布
  1. 磁动势波的幅值大小随时间按正弦规律变化
  2. 磁动势波的节点和振幅所在位置不变
- 磁势的基波分量是磁势的主要成分
  1. 谐波次数越高，振幅越小
  2. 绕组分布和适当短距有利于改善磁势波形
- 基波和各次谐波有相同的脉动频率，都决定于电流的频率
  1.  $v$  次谐波的极对数为  $p_v = vp$
  2.  $v$  次谐波的极距  $\tau_v = \frac{\tau}{v}$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

### 单相绕组脉动磁势的基波分量

- 脉动磁势分解成两个旋转磁势
  - 脉动磁势的节点和幅值的位置是固定不变
  - 脉动磁势可以分解为两个旋转磁势分量
  - 每个旋转磁势：振幅为脉动磁势振幅的一半，旋转速度相同，旋转方向相反

#### 基波分量

$$F_{m1} \sin \omega t \sin x = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x - \pi)$$



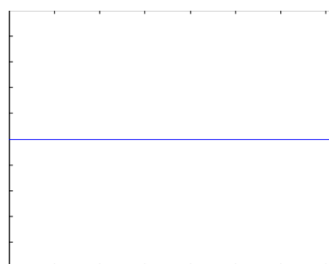
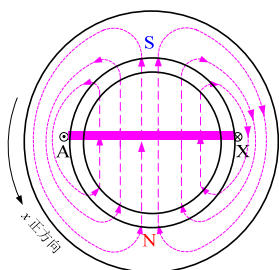
東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 单相绕组脉动磁势的基波分量

脉动磁势的基波分量

$$F_{m1} \sin \omega t \sin x$$



- 在空间上，波形呈正弦分布
- 在时间上，幅值按正弦变化
- 基波是一个**正弦分布的正弦脉振磁势**



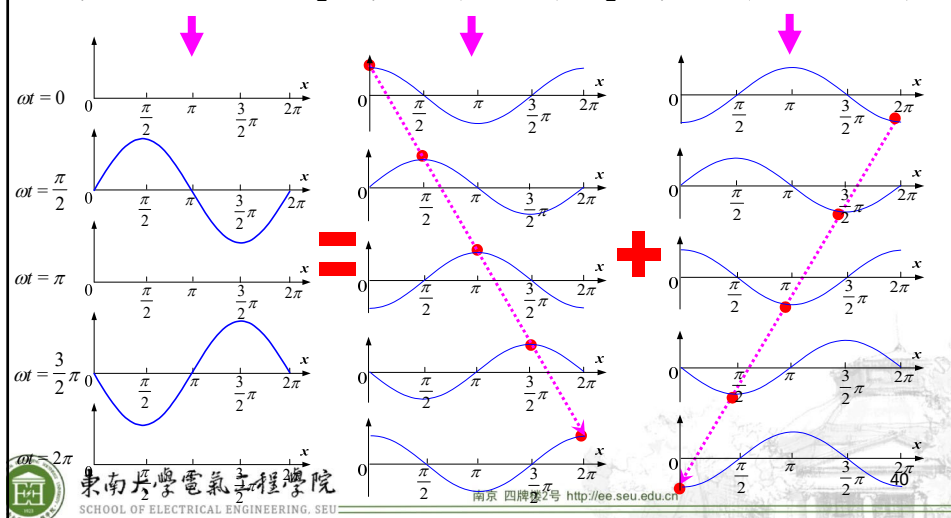
東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 脉动磁势基波分量的分解

积化和差:  $\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$

$$F_{m1} \sin \omega t \sin x = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x - \pi)$$



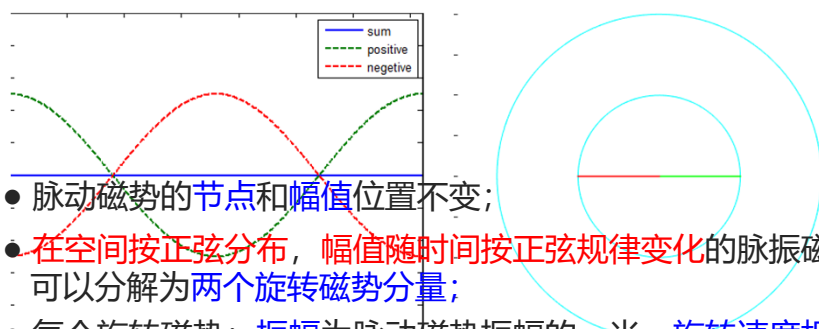
東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 单相绕组脉动磁势基波分量的分解

$$F_{m1} \sin \omega t \sin x = \underbrace{\frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x)}_{\text{正向旋转磁势}} + \underbrace{\frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x - \pi)}_{\text{负向旋转磁势}}$$

正向旋转磁势      负向旋转磁势



- 脉动磁势的节点和幅值位置不变；
- 在空间按正弦分布，幅值随时间按正弦规律变化的脉振磁势可以分解为两个旋转磁势分量；
- 每个旋转磁势：振幅为脉动磁势振幅的一半，旋转速度相同，旋转方向相反。



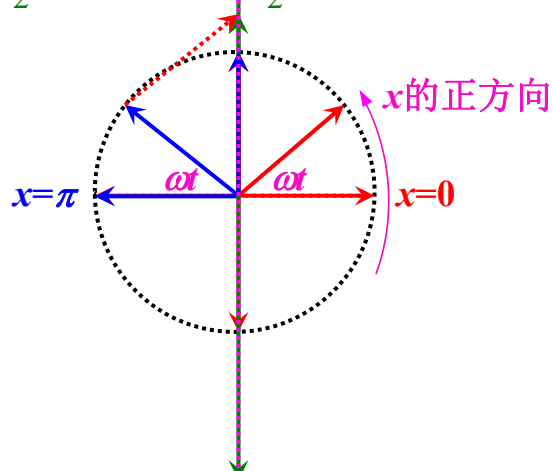
东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 单相绕组脉动磁势基波分量的分解

$$F_{+} = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) \quad F_{-} = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x - \pi)$$

$$f_1 = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x - \pi)$$



## 单相绕组脉动磁势基波分量的分解

**定义：**绕组的轴线为**磁轴或相轴**

**性质：**

- 两空间**磁势矢量**以**相同角速度**向**相反方向**旋转
- 任何瞬间合成磁势的**空间位置固定不变**，在该绕组的**磁轴或相轴**处
- 合成磁势的**大小**随时间按**正弦规律**变化



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1

试题 通以正弦电流时，单相绕组的磁动势是（）

选项 **A 恒定磁势 B 脉振磁势 C 圆形旋转磁势**  
**D 椭圆形旋转磁势**

2

试题 单相绕组的磁动势的最大值出现的位置是（）

选项 **A 相绕组的轴线 B 不确定，随时间变化**  
**C 以上都不是**

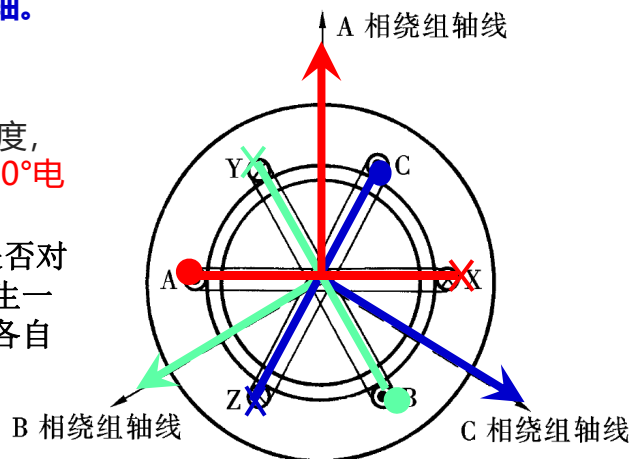


東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 三相绕组有三个磁轴。
- 三相对称绕组指：  
跨距、匝数等相同；  
空间相差120°电角度，  
因此，磁轴也相差120°电角度。
- 不论  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  是否对称，每相绕组均产生一脉动磁势，作用在各自的磁轴上



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 各相的电流瞬时值为  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ ，各相磁势的基波分量分别是：

$$\left. \begin{aligned} f_A &= \frac{1}{2} \times \frac{4}{\pi} \frac{NK_{N1}}{p} i_A \sin x \\ f_B &= \frac{1}{2} \times \frac{4}{\pi} \frac{NK_{N1}}{p} i_B \sin(x - 120^\circ) \\ f_C &= \frac{1}{2} \times \frac{4}{\pi} \frac{NK_{N1}}{p} i_C \sin(x + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

绕组结构相同

绕组空间对称



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



### 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 对称的情况下，由于各相电流的有效值相等，各相脉动磁势的**最大幅值**也相等

$$\left. \begin{aligned} f_{A1} &= \underline{F_{m1}} \sin \omega t \sin x \\ f_{B1} &= \underline{F_{m1}} \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(x - 120^\circ) \\ f_{C1} &= \underline{F_{m1}} \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(x + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

积化和差:  $\sin\alpha \cdot \sin\beta = 1/2 \cos(\alpha - \beta) - 1/2 \cos(\alpha + \beta)$

- 各相脉动磁势均分解成**两个相反方向旋转的旋转磁势**

$$\begin{aligned} f_{A1} &= \frac{1}{2} \underline{F_{m1}} \cos(\omega t - x) - \frac{1}{2} \underline{F_{m1}} \cos(\omega t + x) \\ f_{B1} &= \frac{1}{2} \underline{F_{m1}} \cos(\omega t - x) - \frac{1}{2} \underline{F_{m1}} \cos(\omega t + x + 120^\circ) \\ f_{C1} &= \frac{1}{2} \underline{F_{m1}} \cos(\omega t - x) - \frac{1}{2} \underline{F_{m1}} \cos(\omega t + x - 120^\circ) \end{aligned}$$



东南大学电气工程学院

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 电流对称的情况下，由于各相电流的有效值相等，各相基波脉振磁势的**幅值**也相等

$$\left. \begin{aligned} f_{A1} &= F_{m1} \sin \omega t \sin x \\ f_{B1} &= F_{m1} \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(x - 120^\circ) \\ f_{C1} &= F_{m1} \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(x + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

- 各相电流所产生的**正向旋转磁势**在空间均为**同相**;
- 各相基波脉振磁势均分解成**两个相反方向旋转的旋转磁势**
- 各相电流所产生的**负向旋转磁势**空间相位**差120°**;
- 合成后, **正向旋转磁势直接相加, 负向旋转磁势相互抵消。**

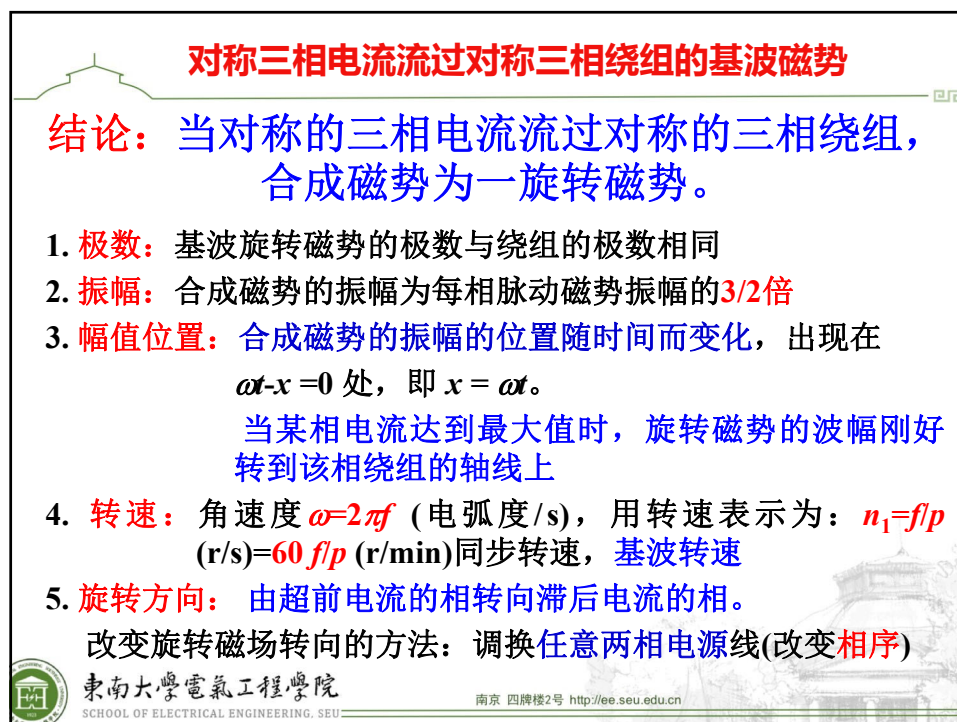
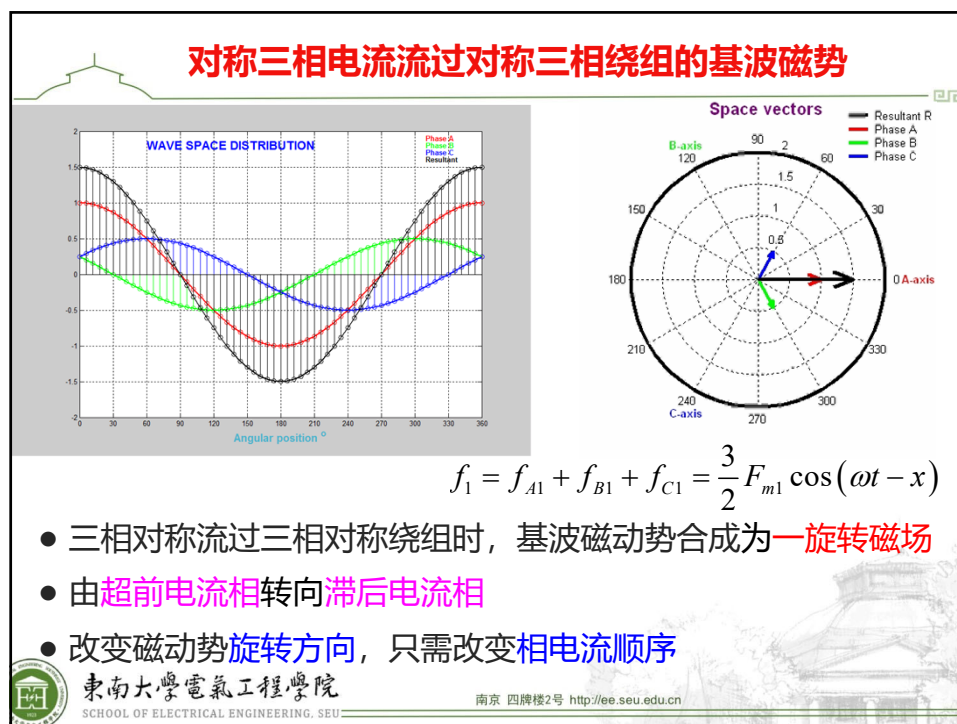
$$\begin{aligned} f_{B1} &= \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) - \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x + 120^\circ) \\ f_{C1} &= \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) - \frac{1}{2} F_{m1} \cos(\omega t + x - 120^\circ) \\ f_1 &= \frac{1}{2} F_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = \frac{3}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) \end{aligned}$$



东南大学电气工程学院

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>





### 1. 单相绕组基波分量

- 在空间上正弦分布
- 在时间上幅值随正弦变化
- 基波是正弦分布的正弦脉振磁势

### 2. 基波脉振磁势的分解

- 脉动磁势的节点和幅值位置不变
- 正弦脉振磁势可以分解为两个旋转磁势分量
- 每个旋转磁势的振幅为脉动磁势振幅的一半，旋转速度相同，方向相反。



### 3. 三相对称绕组通入三相对称电流的基波磁动势

- 各相电流所产生的正向旋转磁势在空间均为同相
- 各相电流所产生的负向旋转磁势空间相位差 $120^\circ$
- 合成后，正向旋转磁势直接相加，负向旋转磁势相互抵消，为一旋转磁势




东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>  
 51

### 4. 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势

- 对称分量法**：将不对称的三相系统分解为三个对称的系统，即**正序系统**、**负序系统**和**零序系统**
- 每相电流分解为三个分量（ $I_+$ 、 $I_-$ 、 $I_0$ ），每相磁势也可分解为三个分量（ $F_+$ 、 $F_-$ 、 $F_0$ ）
- 当**正序**电流流过三相绕组时，产生正向旋转磁势——**正序旋转磁势**
- 当**负序**电流流过三相绕组时，产生负向旋转磁势——**负序旋转磁势**



东南大学电气工程学院  
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 零序电流的磁势

- 当绕组为**星形**联接时，各相**零序电流为零**，不存在零序磁场
- 当绕组按**三角形**连接时，各相**零序电流为同相位**，由零序电流所产生的各相零序磁势在空间相位差**120°**电角度，互相抵消，也不产生零序旋转磁场



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### 4. 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势

$$i_A = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \theta_+) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \theta_-) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$i_B = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \theta_+ - 120^\circ) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \theta_- + 120^\circ) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$i_C = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \theta_+ + 120^\circ) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \theta_- - 120^\circ) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

#### 正序旋转磁势

$$f_+ = \frac{3}{2} F_{1+} \cos(\omega t + \theta_+ - x) = F_+ \cos(\omega t + \theta_+ - x)$$

#### 负序旋转磁势

$$f_- = \frac{3}{2} F_{1-} \cos(\omega t + \theta_- + x) = F_- \cos(\omega t + \theta_- + x)$$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

#### 4. 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势

► 当电流为一**不对称**的三相电流，气隙**合成磁势**：

$$f_1 = f_{1+} + f_{1-} = \frac{3}{2} F_{1+} \cos(\omega t + \theta_+ - x) + \frac{3}{2} F_{1-} \cos(\omega t + \theta_- + x)$$

- 正向旋转磁势  $f_{1+}$  和负向旋转磁势  $f_{1-}$  旋转速度**大小相同**
- 正向旋转磁势  $f_{1+}$  和负向旋转磁势  $f_{1-}$  旋转方向**相反**
- 正向旋转磁势  $f_{1+}$  和负向旋转磁势  $f_{1-}$  幅值大小**不等**

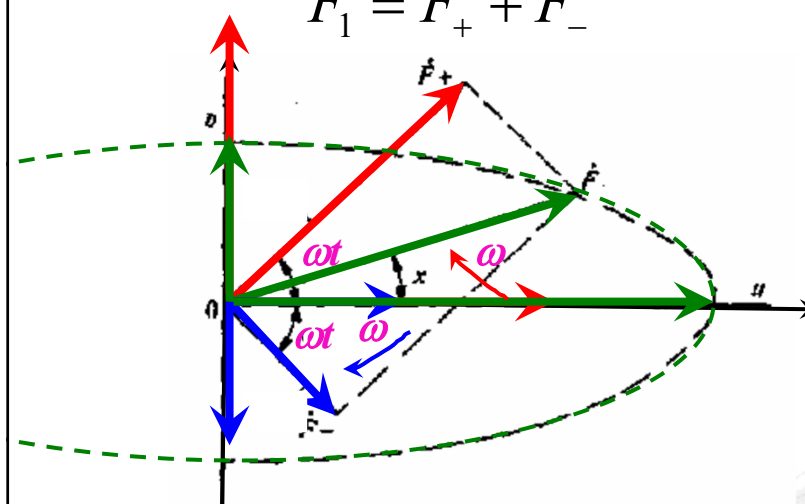


東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

#### 4. 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势

$$F_1 = F_+ + F_-$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

#### 4. 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势

椭圆方程: 
$$\frac{u^2}{(F_+ + F_-)^2} + \frac{v^2}{(F_+ - F_-)^2} = 1$$

➤ 在任一瞬间的合成磁势仍按正弦分布，用旋转矢量表示为空间矢量和，不同时刻，有不同的振幅，其端点轨迹为一椭圆

• 振幅:

$$F = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{F_+^2 + F_-^2 + 2F_+F_- \cos 2\omega t}$$

• 转速:

$$\frac{dx}{dt} = \omega \frac{F_+^2 - F_-^2}{F^2}$$

• 两个特例:

(1) 圆形旋转磁场; (2) 脉动磁场



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

#### 5. 三相绕组磁动势的空间谐波分量和时间谐波分量

➤ 磁动势的空间谐波分量

$$f_A = F_{m1} \sin \omega t \sin x + F_{m3} \sin \omega t \sin 3x + F_{m5} \sin \omega t \sin 5x + F_{m7} \sin \omega t \sin 7x + \dots$$

$$f_B = F_{m1} \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(x - 120^\circ) + F_{m3} \sin(\omega t - 120^\circ) \sin 3(x - 120^\circ) + F_{m5} \sin(\omega t - 120^\circ) \sin 5(x - 120^\circ) + F_{m7} \sin(\omega t - 120^\circ) \sin 7(x - 120^\circ) + \dots$$

$$f_C = F_{m1} \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(x + 120^\circ) + F_{m3} \sin(\omega t + 120^\circ) \sin 3(x + 120^\circ) + F_{m5} \sin(\omega t + 120^\circ) \sin 5(x + 120^\circ) + F_{m7} \sin(\omega t + 120^\circ) \sin 7(x + 120^\circ) + \dots$$



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 三相合成磁势

$$f = f_A + f_B + f_C$$

$$= \frac{3}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x) - \frac{3}{2} F_{m5} \cos(\omega t + 5x) + \frac{3}{2} F_{m7} \cos(\omega t - 7x) + \dots$$

- 基波分量合成为**正向**的旋转磁势
- **3次**谐波以及**以3为倍数的奇次**谐波分量(9、15、21...), 三相合成磁势**为零**
- **$v=6k-1$** 的各次空间谐波均为**负向**旋转磁势, 转速为基波分量的**1/5**
- **$v=6k+1$** 的各次空间谐波均为**正向**旋转磁势, 转速为基波分量的**1/7**



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 磁势空间谐波分量小结

$$p_v = v p$$

$$n_v = \frac{60 f}{p_v} = \frac{60 f}{v p} = \frac{n_1}{v}$$

$$f_v = \frac{3}{2} F_{mv} \cos(\omega t \pm v x)$$

**$v=6k-1$  取 “+”**

**$v=6k+1$  取 “-”**



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 5. 三相绕组磁动势的 空间谐波分量和时间谐波分量

### ➤ 磁动势的时间谐波分量

$$\begin{aligned}
 i_A &= \sqrt{2}I_1 \sin \omega t + \sqrt{2}I_3 \sin(3\omega t + \alpha_3) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_5 \sin(5\omega t + \alpha_5) + \sqrt{2}I_7 \sin(7\omega t + \alpha_7) + \dots \\
 i_B &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + \sqrt{2}I_3 \sin 3(\omega t - 120^\circ + \alpha_3) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_5 \sin 5(\omega t - 120^\circ + \alpha_5) + \sqrt{2}I_7 \sin 7(\omega t - 120^\circ + \alpha_7) + \dots \\
 i_C &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + 120^\circ) + \sqrt{2}I_3 \sin 3(\omega t + 120^\circ + \alpha_3) \\
 &\quad + \sqrt{2}I_5 \sin 5(\omega t + 120^\circ + \alpha_5) + \sqrt{2}I_7 \sin 7(\omega t + 120^\circ + \alpha_7) + \dots
 \end{aligned}$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 5. 三相绕组磁动势的 空间谐波分量和时间谐波分量

### ➤ 磁动势的时间谐波分量

$\mu$ 次谐波电流产生的三相合成磁势:

$$f_\mu = \frac{3}{2} F_\mu \cos(\mu\omega t \pm x)$$

$\mu$ 次谐波电流产生的三相合成磁势( $\nu$ 次空间磁势):

$$f_{\mu\gamma} = \frac{3}{2} F_{\mu\gamma} \cos(\mu\omega t \pm \gamma x)$$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



## 谐波磁场的不良影响:

- 产生谐波感应电势。谐波电势所产生的附加损耗不仅降低效率，而且降低功率因数
- 谐波磁势产生的附加力矩，将会影响电动机的起动力矩和过载能力
- 设计时应当尽量设法削弱磁势的高次谐波分量，特别要削弱其中影响最大的5次谐波和7次谐波
- 与削弱谐波电势一样，通常采用适当短距和分布绕组来削弱空间谐波磁势以改善磁势的波形，使其接近于正弦分布波



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 作 业

➤ 习题: p. 131-133: 7-2、7-3、7-6



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>